

論文の内容の要旨

論文題目

Study of disk winds in low mass X-ray binaries to determine their driving mechanisms

(低質量X線連星における円盤風駆動機構の解明)

トマルリョウタ

氏名 都丸 亮太

ブラックホールや中性子星が形成する極めて強い重力場への物質の降着は、宇宙で普遍的に存在する現象であり、X線天文学の主要な研究対象となっている。近年、系内のX線連星や活動銀河核においてガスが高速で噴出するアウトフロー現象が報告され、その成因や周辺環境にもたらす効果など、重要な研究課題となっている。このアウトフローは、コリメートされたジェット、あるいは広がった円盤風として観測される。共に大きな質量や運動エネルギーを輸送するため、周辺の環境に影響を与えうる。

降着過程において、アウトフローがどこで発生し、どのように駆動されるか、またジェットと円盤風との間に関連があるかなど、多くの問題が未だに解決されていない。ジェットの駆動については、磁場が重要であることが認識されているが(e.g. Blandford & Znajek, 1977)、円盤風は、ガス圧勾配力(熱駆動)、円盤からの放射による放射力(放射駆動)、円盤を貫く磁場のローレンツ力(磁気駆動)のいずれか、または総和によって駆動されると考えられている。現象そのものが認識されてきたのが最近であり、理論的考察と観測とを直接比較して、その物理的描像を引き出す試みが遅れている。

我々の銀河系内の低質量X線連星(LMXB)は、こうした降着流とアウトフローの物理を詳細に理解するために最も適した天体である。LMXBはX線で明るく輝き、数日から数ヶ月での強い時間変動とそれに伴うスペクトルの変動が観測されている。時間変動に伴い、スペクトルは光度が大きく約1 keVの黒体放射が支配的なソフト状態、光度が小さく約100 keV熱的電子によるコンプトン散乱が支配的なハード状態とを遷移するため、円盤風の有無との比較から、円盤風の駆動機構の手がかりを得ることができる。また質量輸送は星風ではなく、伴星の表面から質量が輸送されるロッシュローブオーバーフローにより行われるため、星風の影響なく、円盤風の駆動機構を探ることができる。

X線による高分解能スペクトル観測により、高電離イオンの吸収線の青方偏移、すなわち、円盤風の証拠が確認されている。円盤風はソフト状態にのみ観測され、ハード状態では観測されない(Ponti et al., 2012, 2014)。ジェットからの電波放射はハード状態では観測されるが、ソフト状態では観測されないため(Miller-Jones et al., 2012)、ジェットと円盤風の反相関が指摘されている。これを説明するために磁場構造がジェットと円盤風を切り替えているという考えが存在している。しかしながら、円盤風は中心領域からの強いX線照射加熱による熱駆動(Begelman et al., 1983)によっても噴出するため、決着がつかっていない。

本研究では、観測される吸収線スペクトルが、いかに熱駆動型円盤風で説明できるかを調べ、円盤風の駆動機構を探ることを目的とする。熱駆動型に基づいた研究を行う場合、これまで

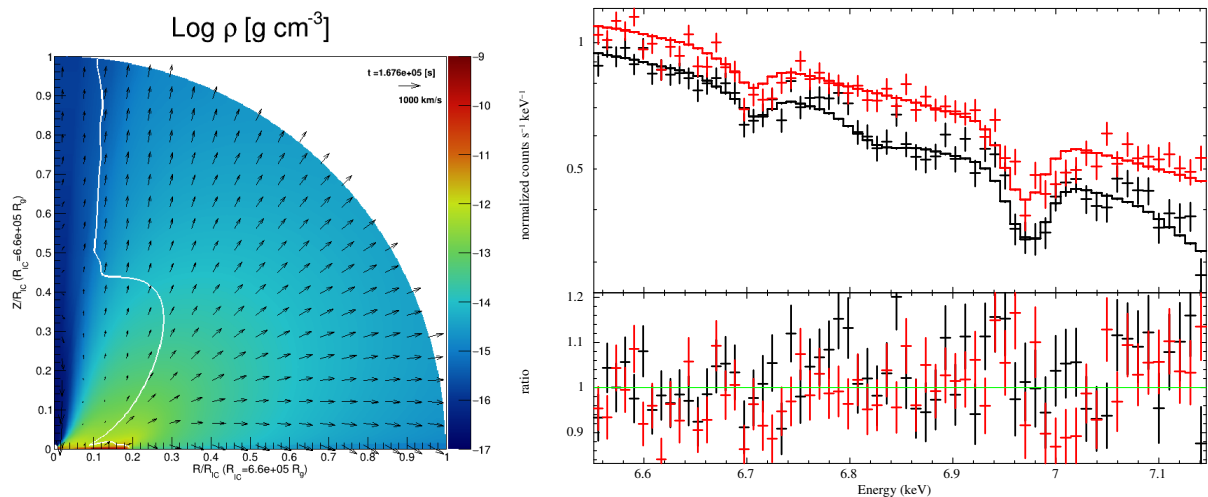


図1. 左: H 1743-322のソフト状態の連続スペクトルを入力とした放射流体シミュレーションによる密度 (カラー), 速度 (矢印), 白実線はマッハ 1 となる線。右: その密度, 速度分布を通して作られる輝線吸収線構造 (実線) と X線天文衛星 *Chandra* 搭載の High Energy Gratings (HEG) によるデータ。色は HEG +1 (黒), と HEG-1 (赤)。

は、個別の天体の観測データに適用可能なモデルがなく、磁気駆動を持ち込まざるを得ない状況も存在していた。我々は、熱駆動型で期待されるスペクトルを理論から観測結果との直接比較可能なスペクトルの予言までを統一的に実現するフレームワークを開発し、円盤風の駆動機構の定量的研究を行うこととした。

第一に、熱駆動型円盤風で期待される質量損失率 (Woods et al., 1996) から、シンプルな幾何構造と密度分布を仮定することで、従来の流体シミュレーションで得られた柱密度を再現した。加熱源の X 線スペクトルの形を光度の関数として入力とすることで、このモデルが、スペクトル遷移に対してどのような柱密度、電離度を取るのかを調べた。その結果、このモデルはソフト状態では、大きい光度のために、X線照射加熱が効率的に行われ、大きな柱密度を取ることで、ハード状態では、逆の理由で柱密度が小さいことに加え、硬 X 線により円盤風が完全電離してしまうことを明らかにした。この結果は、熱駆動型円盤風がスペクトル遷移の吸収線の有無を自然に説明できることを示した初めての結果である。

現実的に観測データを説明するためには、理論的な円盤風のガスのダイナミクスを計算し、その中で作られる輝線吸収線構造を観測と比較するということが重要である。そのためには、理論的な放射流体シミュレーションと放射輸送シミュレーションを組み合わせたフレームワークの開発が必要である。我々は観測から得られる連続 X 線スペクトルを入力として、X 線照射によるガスの加熱冷却率と、ガスでの X 線の減光とそれに伴う加速 (放射力) を考慮した、放射流体コードと、それから得られる密度、速度分布を使用し、その内部で作られる輝線吸収線構造をモンテカルロ法により計算する放射輸送コードを開発、フレームワークとして組み合わせた。放射流体コードは、軸対称 2 次元極座標を用いた放射流体コードであり、X 線連続スペクトルとその大きさ (エディントン比) と降着円盤の大きさを入力とする。

放射輸送のシミュレーションは、これまでの研究で不十分であった点である。われわれは、熱駆動型円盤風からの吸収線構造を観測スペクトルと直接比較するために、放射輸送シミュレーションコードを構築し、熱駆動型円盤風の質量損失率 (Woods et al., 1996) から、物理的な幾何構造と速度分布を仮定することで、流体シミュレーションの結果を再現し、そこからの輝線吸収線構造を放射輸送シミュレーションにより求めた。この結果を明るい (~ 0.5 LEdd) 中性子星 GX 13+1 に適用した結果、計算スペクトルは観測スペクトルのおおよそその特徴を示したが、速度

が遅いということが明らかになった。これは、大きい光度による放射力が円盤風のダイナミクスに大きな影響を与えており、実際には、円盤風は熱放射駆動型円盤風として存在していることを示唆する。

より現実的なモデルを構築するために、最後のステップとして、放射輸送シミュレーションの入力に、熱放射駆動型円盤風の放射流体シミュレーションで得られる密度、速度分布を利用することで、統一的なフレームワークとした。開発した放射流体コードに、ブラックホール低質量X線連星H1743-322のソフト状態、ハード状態のスペクトルを入力として使用することで、放射流体シミュレーションを実行した(図1, 左)。その結果、ソフト状態では放射力を考慮することで観測と同等の速度を得られることを示した。さらに、円盤の大きさを変化させることで、観測と同等のイオン柱密度を得ることに成功した。ハード状態では1つ目のモデルと同じ理由で、観測できないことが明らかになった。これによりソフト状態のみで円盤風が観測されるという事実は、熱—放射駆動型円盤風で説明できること放射流体シミュレーションにおいても確認された。

観測スペクトルと比較するために、ソフト状態の放射流体シミュレーションで得られた密度、速度分布を使用し、放射輸送コードにより輝線吸収線構造を得た。得られた構造は、円盤風の内側に存在する静的な大気 (corona) と、円盤風から作られる特徴的な吸収線構造を示した。さらにこれを観測スペクトルと比較した結果、観測される輝線吸収線構造をよく再現した(図1, 右)。また、得られた特徴的な吸収線構造は、連星の公転周期が大きい系、すなわち、円盤が大きい天体ほど顕著な青方偏移を示しているという観測事実 (Díaz Trigo & Boirin 2016) と無矛盾であり、さらにこの観測事実と円盤全体からの自己相似的な大局的磁場構造による磁気駆動型円盤風モデル (Fukumura et al., 2017), について考察することで、このような磁場構造を否定する結果を得た。得られた特徴的な吸収線構造が、将来のX線天文衛星XRISMで観測可能であることも示した。

これらの議論から、ブラックホールLMXBにおける円盤風駆動機構について図2の描像が得られた。ソフト状態では、降着円盤が形成され、そこからの放射が主体となる。この降着円盤は磁気回転不安定性 (MRI) によりサポートされ、大局的に揃った磁場構造は存在しない。円盤からの放射を受けて円盤の表面には、静的なコロナが形成され、外側ではそのコロナが熱—放射駆動型円盤風として存在する。ハード状態では、内側の円盤は光学的に薄く、幾何的に厚い高温降着流に変化し、そこから大局的に大きな磁場構造が発達しジェットが発生する。高温降着流からのX線が円盤表面を加熱することで同様のコロナが存在し、外側で熱駆動型円盤風が発生するが、完全電離状態のため吸収線として観測されない。

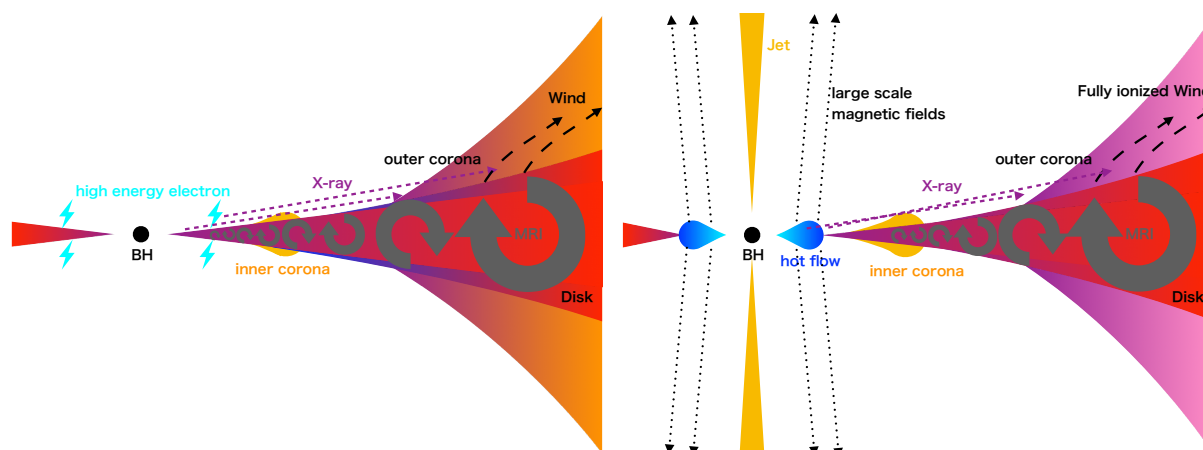


図2. ソフト状態 (左) とハード状態 (右) におけるブラックホール降着流の模式図。

我々は、この円盤風駆動機構の普遍性を確認するために、系内で最も円盤が大きい、GX 13+1についても、観測される光度、スペクトルの形、そして円盤の大きさを入力として放射流体シミュレーションを行った。このシミュレーションは他のパラメータを加えることなしに、観測と無矛盾なイオン柱密度、速度を再現し、その質量損失率は解析的な扱いをしたもの(Done et al., 2018)とよく一致した。この天体では、大きな柱密度を持つために、輝線吸収構造とその吸収線の等価幅は、円盤風内部の乱流に大きく依存する。ここでは、乱流なし、動径速度、回転速度の3パターンを乱流として輝線吸収線構造を計算した。得られた輝線や吸収線の構造は、観測された構造をよく説明できた。中でも、回転速度と同等(~ 200 km/s)の乱流を加えたモデルが一番観測と一致した。乱流の起源は不明であるが、円盤風の回転速度差によるKelvin-Helmholtz不安定性が一つの候補であることを示唆している。これらにより中性子星においても、円盤風は熱—放射駆動で説明可能であることを示した。これらの結果から、LMXBにおける吸収線の起源は熱—放射駆動機構であると結論づけた。本研究により我々は観測から円盤風の特徴(質量損失率等)を定量的に予測できるようになった。